# 基于靶标叶面积密度参数的变量喷雾控制系统开发与性能试验

范道全[1]，张美娜[2]，潘　健[1]，吕晓兰[1*]

（1. 江苏省农业科学院农业设施与装备研究所,江苏南京 210014；
2. 江苏省农业科学院农业信息研究所,江苏南京 210014）

**摘　要：**变量喷雾技术是提高农药利用率、节省农药用量的重要手段之一。为达到果园施药减量增效的效果，本研究开发了一种变量喷雾控制系统，提出了叶面积密度参数与执行机构脉宽调制（Pulse Width Modulation，PWM）占空比的计算方法。该系统上位机基于激光LiDAR传感器探测的点云密度表征叶面积密度作为施药参数，并根据喷药处方计算各喷头对应电磁阀的PWM占空比，通过RS485通讯实时发送施药处方到下位机的可编程逻辑控制器（Programmable Logic Controller，PLC），下位机PLC根据接收的PWM占空比控制对应电磁阀的开关频率实现喷头喷雾流量的调节。通过试验测量了施药单元网格尺寸、系统延时时间以及PWM占空比与喷头流量之间的模型参数三部分关键系统参数。结果表明在0.2、0.3和0.4 MPa压力下PWM占空比与喷头流量之间均为线性关系，线性拟合优度均在0.98以上。最后，通过喷雾试验验证变量喷雾样机的有效性，试验结果表明，采样点水敏纸上单位面积（$cm^2$）最少雾滴个数为35滴，达到了有效喷雾效果；当靶标冠幅与总冠幅比为39.9%时，变量喷雾模式相比于连续恒定式喷雾省药71.96%，相比于对靶开关式喷雾省药29.72%，达到了减量效果。

**关键词：**变量喷雾；LiDAR；叶面积密度；控制策略；脉宽调制

**中图分类号：**S491　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**202107-SA007

引用格式：范道全, 张美娜, 潘健, 吕晓兰. 基于靶标叶面积密度参数的变量喷雾控制系统开发与性能试验[J]. 智慧农业(中英文), 2021, 3(3): 60-69.

FAN Daoquan, ZHANG Meina, PAN Jian, LYU Xiaolan. Development and performance test of variable spray control system based on target leaf area density parameter[J]. Smart Agriculture, 2021, 3(3): 60-69. (in Chinese with English abstract)

## 1　引　言

当前，中国果树的病虫害防治主要是以化学农药为主。传统常量、连续式喷药方式使得药液严重浪费，流失药量影响果园环境安全、生态安全和作业人群身体健康[1]。精准变量施药技术是节省农药用量、提高农药利用率的重要手段，与传统连续恒定喷雾方式相比可节省农药量25%以上[2-4]。

精准变量施药技术是根据作物冠层信息实时

收稿日期：2021-07-20　修订日期：2021-09-03

基金项目：国家自然科学基金项目（61803187）；国家现代农业产业技术体系资助（CARS-28-20）

作者简介：范道全（1993—），男，硕士，研究方向为精准施药技术研究。E-mail：1178416392@qq.com。

*通讯作者：吕晓兰（1980—），女，博士，研究员，研究方向为施药技术与植保机械装备研究。电话：15062270867。E-mail：lxlanny@126.com。

调整喷雾量，从而达到节省农药、按需施药的目的[2,5-7]。传感器无损检测技术是实现精准施药的基础，研究者对基于红外传感器[8,9]、超声波传感器[10-12]、激光雷达（Light Detection and Ranging，LiDAR）传感器[13,14]、立体视觉[15,16]实现果树靶标精准探测做了相关研究。Rosell 和 Sanz[17]详细总结了上述探测传感器的优缺点，指出二维 LiDAR 探测精度高、速度快，是最具发展潜力的应用技术之一。Liu 和 Zhu[18]利用 LiDAR 传感器探测复杂靶标的外形轮廓。李秋洁等[19]采用二维 LiDAR 传感器探测出树冠中心距离并计算了冠层体积。

对果树靶标进行精准探测并提取准确的喷雾参数是为变量喷雾控制系统提供喷雾处方的前提，随着果园靶标位置和外形轮廓等外部特征信息探测难题的突破，靶标内部枝叶稠密程度分布等研究将是未来的研究方向[20]。Sanz 等[21]利用二维 LiDAR 构建靶标三维点云图，得到冠层枝叶上的激光点云数量与叶面积之间有很好的线性关系。Palleja 和 Landers[11,12]通过超声波传感器对葡萄园和苹果园进行探测，结果得出超声回波强度与靶标枝叶稠密程度正相关关系。李龙龙等[22]结合单元体积和密度模型做为雾量和风量调节的依据，研制雾量、风量自动调节的果园风送喷雾机，试验结果表明喷雾机性能达到了果园病虫害防治要求。李秋洁等[23]提出了基于移动 LiDAR 技术计算叶面积密度的方法，建立了靶标总体格网面积与实际叶面积的线性回归模型，拟合优度达 0.9090。薛秀云等[24]设计了一种基于叶墙面积（Leaf Wall Area，LWA）的果树变量喷雾模型，模型结合分区内点云密度和分区面积实时调整施药量，试验结果证明此种施药模型可实现有效喷雾，比连续恒定式喷雾节省农药 68.34%。

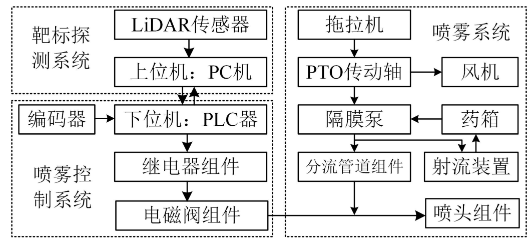
国内外对基于靶标叶面积密度计算喷雾机施药参数的研究整体上处于初级阶段，为此，本研究设计一种基于靶标叶面积密度信息实时调节喷雾量的喷雾控制系统，通过移植到传统喷雾机上进行试验研究，验证新型精准变量风送喷雾机的喷雾减量增效效果。

## 2 材料与方法

### 2.1 变量喷雾系统结构

#### 2.1.1 硬件系统结构

变量喷雾系统总体结构如图 1 所示，主要分为靶标探测系统、喷雾控制系统和喷雾系统三个部分。靶标探测系统中的 LiDAR 传感器用于探测果树靶标，PC 机作为上位机用于传感器数据的采集与处理；喷雾控制系统中的可编程逻辑控制器（Programmable Logic Controller，PLC）作为下位机用于接收上位机的施药处方并控制继电器驱动电磁阀动作；喷雾系统用于恒定供应农药并在控制器作用下实现变量喷施农药。



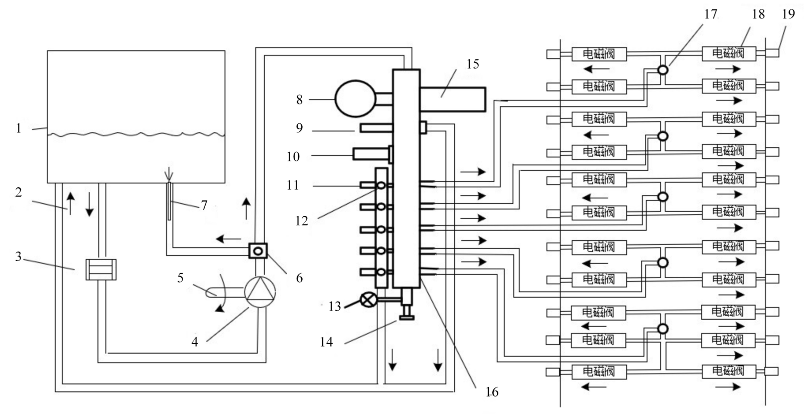

注：个人计算机(Personal Computer，PC)；辅助动力输出(Power Take Off，PTO)

图 1 喷雾机系统总结构图

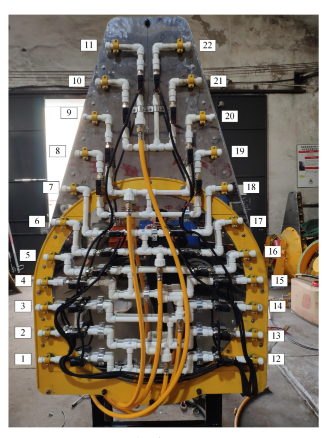
Fig. 1 Overall structure diagram of spray system

喷雾系统按药液流向分为三级分流，如图 2 所示。首先，药箱药液在隔膜泵作用下出药箱，在一级分流器处分为两部分，一部分流入主路管路，另一部分通过射流装置流回药箱搅拌药液；然后，主管路内药液经二级分流器（5 路管道分流器）流入 5 路支路管道；最后，支路管道内药液经三级分流器分出 22 路管路（两侧各有 11 个雾化单元）并经电磁阀输送到各雾化喷头。系统中，22 个喷头按高度分成 5 路，可减少两侧同高度喷头压力差；22 个电磁阀与喷头间距在 0.1～0.2 m 范围内，可减少药液运输管道长度带来的喷雾滞后的影响。

搭载变量喷雾系统的平台为 M604L-E 型雷沃拖拉机与挂载的 3WGF-500A 悬挂式风送式喷



(a)喷雾机喷雾系统改装结构框图



(b)喷雾管道布局图

注：1. 药箱 2. 药液流向 3. 过滤器 4. 隔膜泵 5.PTO 传动轴 6. 一级分流器 7. 射流装置 8. 稳压球 9. 分流器总开关 10. 分流器总调压阀 11. 分流器单路开关 12. 分流器单路调压阀 13. 压力表 14. 压力传感器 15. 过滤器 16. 二级分流器（5路管道分流器）17. 三级分流器 18. 电磁阀 19. 雾化喷头

图2 喷雾系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of spray system

雾机。改装完成的变量喷雾机样机如图3所示，主要包括LiDAR传感器（LMS111-10100）、增量式编码器（DBS36E）、隔膜泵（MB480/3.0）、5路管道分流器（SKD）、压力传感器（0～1.0 Mpa）、药箱（500 L）、雾化单元（包括试制管道、电磁阀与雾化喷头）、PLC控制器（S7-200 Smart）、电源（24VDC）等。



注：1. 拖拉机 2. PC机 3. 悬挂装置 4. 管道分流器 5. LiDAR传感器 6. PLC控制器 7. 药液箱 8. 风机 9. 雾化单元 10. 电源 11. 增量式编码器 12. PTO传动轴 13. 隔膜泵 14. 钣金门

图3 改装完成的喷雾机实物图

Fig. 3 The picture of the modified sprayer

### 2.1.2 软件系统结构

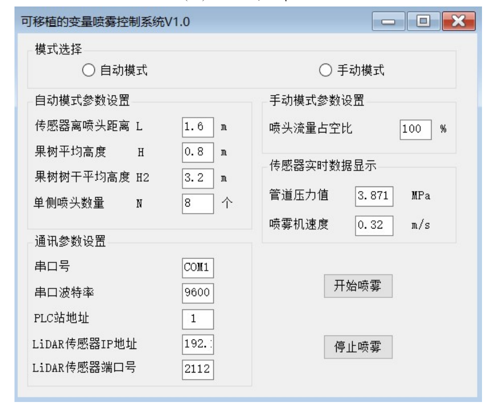
软件系统包括上位机软件与下位机软件两部分开发内容。系统上位机基于Visual Studio 2019开发环境，采用微软基础类库（Microsoft Foundation Class，MFC）多线程编程技术开发，系统线程包括对话框主线程、数据处理线程和串口通讯线程共3个线程。对话框线程用于人机交互界面显示和喷雾参数设置；数据处理线程用于激光点云数据处理与施药参数的计算；串口通讯线程用于上、下位机数据通讯。系统下位机基于STEP 7-MicroWIN SMART软件开发，包括编码器和压力传感器的数据采集以及控制信号的生成。上位机COM口与下位机的RS485物理端口连接，遵循Modbus RTU通讯协议建立通讯。开发后的上、下位机人机交互界面如图4所示。

## 2.2 变量喷雾系统控制方法

与恒定连续式喷雾机相比，变量喷雾机单个喷头流量可控，基于软硬件平台，变量喷雾系统控制方法用于实现根据各喷头对应靶标施药区域内的叶面积密度变化实时调整相应喷头流量，从而达到变量喷施的目的。喷头流量控制采用脉宽调制（Pulse Width Modulation，PWM）技术，该技术无需改变喷雾系统压力，对喷雾特性影响较小。喷雾机作业前，需根据喷雾机喷头喷幅将靶标区域进行网格化分割，每个网格立体单元为一个施药单元，各喷雾单元的体积相同、内部叶面积密度不同。下面主要阐述喷雾单元内叶面积




（a）上位机界面




（b）下位机界面

图4 上、下位机人机交互界面

Fig. 4 User-interface of upper and slave computer

密度计算方法与执行机构电磁阀对应的PWM占空比计算方法。

### 2.2.1 施药单元叶面积密度计算方法

果树靶标是一个立体的空间，同一时期不同位置的果树冠层枝叶茂密度并不相同，喷雾的理想状态是能够根据局部密度调整施药量。靶标网格化示意图如图5所示，需要确定的网格参数为高度 $H$ 与横向宽度 $W$。网格的高度划分原则一般根据靶标区域内对应的喷头数量确定，即喷雾机单侧喷头数量为N个，树冠的高度为 $H1$，将树冠延y方向上均匀分割成 $N$ 个区域，即 h=$H1/N$；横向宽度 $W$ 通过喷雾机喷雾试验确定。

研究团队在前期研究工作中得到，假设各施药单元内叶面积变化相对较小的条件下，基于确定的点云数与叶片数间的函数方程，经系数变换后可计算出叶面积密度参数[25]。因此，只需要计算各施药单元内的点云个数累加值 $k_i$, $i = 1, 2, ..., n$，获得施药单元叶面积密度参数 $\rho_i$ 记为：

$$\rho_i = f(k_i) \tag{1}$$

靶标区域点云个数受LiDAR传感器扫描频率、样机作业速度、LiDAR传感器至靶标的距离以及作业环境所影响。其中，传感器频率为固定值，操作人员延果树行中心线行驶，样机行驶速度不均匀引起的三维点云数据分布不均匀已由团队前期研究的插值算法进行了数据补偿[26]。

### 2.2.2 PWM占空比计算方法

施药单元内的点云数量越多表示树叶片数越多，树冠越密，对应的喷雾量也应越大。最大施药量 $Q_{max}$（单位，L）对应施药单元最大叶面积密度 $\rho_{max}$，则各施药单元对应的施药量为：

$$Q_i = Q_{max} \times \frac{\rho_i}{\rho_{max}}, i = 1, 2, ..., n \tag{2}$$

其中，$Q_i$ 为喷施到该区域要总药量，L。

施药单元对应的喷头流量 $q_i$（单位，L/min）为 $Q_i$ 与作业时间 $t$ 的比值，即：

$$q_i = \frac{Q_i}{t}, i = 1, 2, ..., n \tag{3}$$

借鉴相关研究经验，单个喷头流量 $q_i$ 与占空比 $X_i$ 存在一种线

（a）靶标冠层分割示意图　（b）靶标冠层探测示意图

注：$\theta_i$ 为第i层上限激光束与水平夹角；$\theta_{i-1}$ 为第(i−1)层上限激光束与水平夹角；$z_i$ 为第i层的上限高度值；$z_{i-1}$ 为第i−1层的上限高度；H为LiDAR传感器离地面高度；H1为树冠高度；d为LiDAR离靶标的最近距离；D为靶标行距

图5 靶标冠层分割及探测示意图

Fig. 5 Schematic diagram for calculating the number of theoretical laser points in a single row

性关系[27,28]：

$$q_i = aX_i + b, i = 1, 2, ..., n \quad (4)$$

其中，$a$为斜率，$b$为截距。

根据公式（2）～（4）得到对应施药单元内控制相应喷头的电磁阀PWM占空比计算公式为：

$$X_i = \frac{1}{a} \times (\frac{Q_{max}}{t} \times \frac{f(k_i)}{f(k_{max})} - b), i = 1, 2, ..., n \quad (5)$$

其中，$k_{max}$为LiDAR输出频率确定后能输出的激光点个数最大值，个；$k_i$基于传感器反馈数据实时计算；$Q_{max}$根据喷雾机喷雾压力与喷头型号确定；$a$、$b$通过喷雾试验数据拟合线性函数获得。

## 3 试验与结果

### 3.1 关键参数测定试验

变量喷雾控制系统模块较多，在集成测试之前需要通过试验确定关键参数，包括施药单元网格尺寸、系统延时时间以及PWM占空比与喷头流量之间的模型参数等。

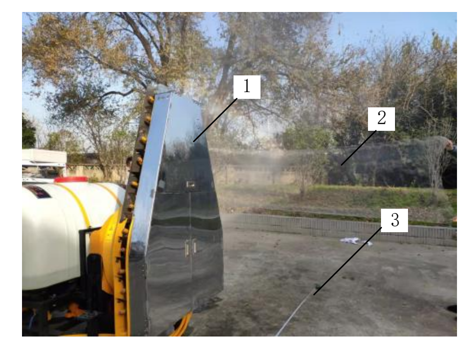
#### 3.1.1 施药单元网格尺寸

喷雾机样机向纱网静态喷雾测定施药单元横向宽度W。纱网可有效过滤喷雾时飘失的小颗粒雾滴，纱网网格尺寸为1.1 mm×1.1 mm。根据果树行距5 m，试验设定纱网距离喷雾机样机中心位置为2.5 m，如图6所示。喷雾机运行一段时间后，人工测量雾滴覆盖区域宽度，取3次试验的平均值，试验结果测得施药单元横向宽度W为0.45 m。

#### 3.1.2 系统延时时间

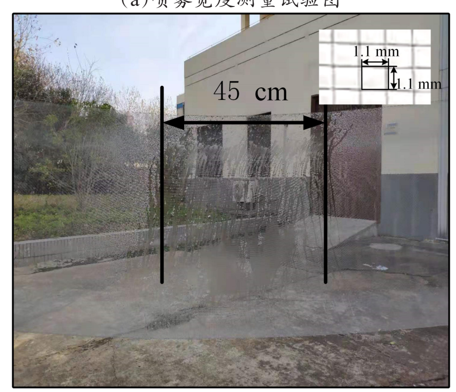
实时精准地计算动态延时时间是实现精准变量喷雾的保证。动态喷雾延时时间由喷雾系统的响应时间、LiDAR传感器与喷头之间的距离和喷雾机作业速度共同决定。喷雾动态延时时间计算公式如下：

$$T_{py} = \frac{L}{v} - t_{systerm} \quad (6)$$




注：1. 喷雾机 2. 纱网 3. 卷尺

(a)喷雾宽度测量试验图



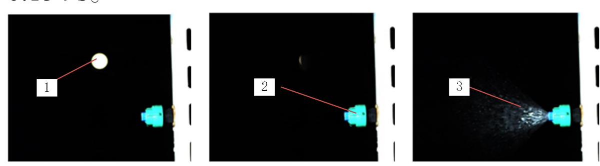

(b)喷雾宽度测量图

图6 喷雾横向有效宽度测定

Fig. 6 Measurement of spray transverse effective width

其中，$T_{py}$为系统延时时间，s；$L$为LiDAR传感器与喷头之间的距离，m；$t_{systerm}$为喷雾系统的响应时间，s；$v$为喷雾机作业速度，m/s。喷雾动态延时由软件定时器实现，需保证$L \geq v \times t_{systerm}$。

喷雾系统响应时间$t_{systerm}$通过高速摄影仪进行测量，设定摄影仪的拍摄帧速为2000 f/s，快门速度为1/20,000 s，通过计算光点刚好消失在采像区到喷头完全喷出雾之间的帧数差获得，如图7所示，取三次试验平均值，测得$t_{systerm}$为0.154 s。




(a)采样前 (b)光点刚好消失采像区 (c)喷头完全喷出雾

注：1. LED灯 2. 喷头 3. 喷雾

图7 高速摄影仪拍摄的动态过程

Fig. 7 Moving process captured by the high-speed camera

### 3.1.3 PWM 占空比与喷头流量之间的模型辨识

系统中使用的电磁阀固定频率为10 Hz，喷头为德国Lecher 4号圆锥雾喷头。当喷雾压力在0.2、0.3和0.4 MPa条件下，利用喷头流量计测量不同PWM占空比下（0%～100%，取10%的整数倍）的喷头流量值，试验结果如图8所示。

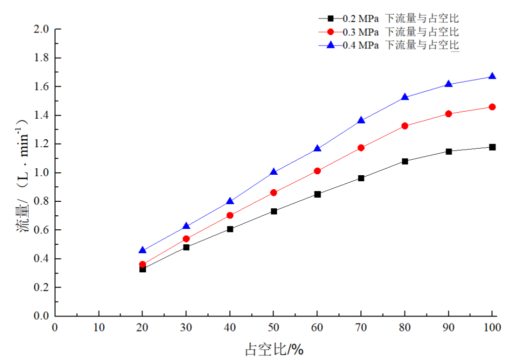



图8 PWM占空比与喷头流量之间的模型辨识

Fig. 8 Model identification between PWM duty cycle and nozzle flow

试验结果表明，当占空比为10%时，电磁阀闭合喷头流量为0，分析原因为电磁阀在单位时间内接通电流短，不足以驱动电磁阀动作；在喷雾压力一定时，PWM占空比（20%～80%区间）与喷头流量之间呈现较好的线性关系；PWM占空比在80%～100%时，喷雾流量较缓增长，线性拟合优度均大于0.98。通过线性拟合得到不同压力下模型方程。

0.2 MPa压力下模型方程公式为：

$$q = 0.011X + 0.1539 \quad (7)$$

$$R^2 = 0.9861$$

0.3 MPa压力下模型方程公式为：

$$q = 0.0143X + 0.1272 \quad (8)$$

$$R^2 = 0.9847$$

0.4 MPa压力下模型方程公式为：

$$q = 0.016X + 0.1735 \quad (9)$$

$$R^2 = 0.9841$$

## 3.2 变量喷雾性能试验

### 3.2.1 试验条件

在江苏省农业科学院农业设施与装备研究所进行变量喷雾机喷雾性能验证试验，测量指标包括雾滴沉积覆盖密度与喷雾量。

果树靶标为6棵仿真树分成三组，冠幅尺寸分别为1.2 m×1.1 m、1.3 m×1.2 m和1.2 m×1.2 m，仿真树平均高度3.2 m，树干平均高约0.8 m，冠幅区域2.4 m高度范围内对应喷雾机单侧3～10号共8个喷头，1、2、11号喷头设置为关闭状态。喷雾系统参数设定如下：喷雾压力0.4 MPa；施药单元网格尺寸为0.45 m×0.30 m；拖拉机速度约0.34 m/s 。

### 3.2.2 试验材料和方法

主要试验材料包括变量风送喷雾机、SP500型三维风速风向自动记录仪、WatchDog 2900ET型气象站以及水敏纸（35 mm×110 mm）雾滴扫描分析软件。具体实施步骤如下：

（1）试验前，使用风速测量仪测量试验环境，保证试验时在0级风下（静风，风速小于0.2 m/s）进行；通过气象站测量环境温度和湿度，保证试验时环境湿度小于80%。

（2）按照标准果园行株距5 m×3 m进行布局，三组靶标间距3 m，喷雾机中心位置距离靶标2.5 m，喷雾长度为9 m，示意图如图9。

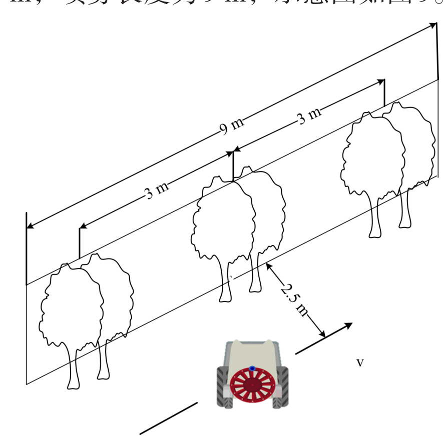



图9 喷雾机试验现场布置示意图

Fig. 9 Site layout of the sprayer test

（3）水敏纸布置。靶标冠层划分按照使用喷头数平均分成4层，每层布置3个水敏纸，每组靶标共布置12个，使用回形针固定在仿真树叶上。水敏纸从上到下、从左到右依次编号1～12号，以验证变量效果横向水敏纸布置点间距需大于0.45 m。水敏纸布置如图10所示。




图 10　水敏纸布置图

Fig. 10  Layout of water sensitive paper

（4）试验时 LiDAR 传感器距离仿真树提前 1 m 开启系统，延后 0.5 m 关闭系统；试验采用自来水作为试验药液。

（5）试验完成后，待雾滴完全浸湿水敏纸后，佩戴一次性手套夹住水敏纸两侧边缘，放入干燥密封瓶内。注意水敏纸收集时避免直接用手接触，产生的斑点会影响数据计算结果。

### 3.2.3　试验结果与分析

（1）变量喷雾雾滴沉积覆盖密度分析。雾滴沉积覆盖密度根据国标《植物保护机械 通用试验方法》（JB/T 9782—2014）[29]，风送喷雾以 25 滴/cm$^2$雾滴密度作为喷雾有效判定条件。变量喷雾系统试验后水敏纸样本如图 11 所示。



图 11　水敏纸局部采样图

Fig. 11  Local sampling diagram of watersensitive paper

水敏纸雾滴扫描分析软件可以自动扫描水敏纸上单位面积内的雾滴的总个数、单位面积内的雾滴沉积量以及所选区域内的雾滴个数。数据分析结果表明，采集到的水敏纸上单位面积（cm$^2$）最小雾滴个数为 35 滴，大于常用风送喷雾机喷幅界定 25 滴，可实现有效喷雾。

（2）变量喷雾的喷雾量分析。对比分析喷雾机连续恒定式喷雾、对靶开关式喷雾与变量喷雾 3 种工作方式下的喷雾量。试验过程中记录 3～10 号 8 个喷头 PWM 占空比变化情况，以*.txt 文件格式保存下来。试验进行 3 次，试验时使用密封袋固定喷头上收集各喷头的喷雾量，累加各喷头喷雾量为总喷雾量，取 3 次测量值平均值为最终的总喷雾量。

试验按照总长 9 m，喷雾冠幅 1.2 m 计算，得到仿真树靶标冠幅占总冠幅比率为 39.9%。表 1 为连续恒定喷雾、对靶开关式喷雾与变量喷雾 3 种工作模式下的喷雾量。

**表 1　3 种喷雾模式喷雾量**

Table 1  Spray quantity of three spray modes

| 喷雾模式 | 喷雾量/L |
|---|---|
| 连续恒定式喷雾 | 2.960 |
| 对靶开关式喷雾 | 1.181 |
| 变量喷雾 | 0.830 |

由表 1 计算可得，与连续恒定式喷雾相比，变量喷雾模式可节省农药 71.96%；与对靶开关式喷药相比，变量喷雾模式可节省农药 29.72%。

同时，3～10 号喷头 PWM 占空比变化情况如图 12 所示，可知 3 号和 6 号两个喷头 PWM 占空比大小接近，4 号和 5 号两个喷头 PWM 占空比大小接近，且 3 号和 6 号两个喷头的 PWM 占空比小于 4 号和 5 号两个喷头的 PWM 占空比。观察靶标冠层，3 号和 6 号喷头对应的靶标冠层间隙较多，4 号和 5 号喷头对应的靶标冠层间隙较少；7 号喷头有较小占空比，按照分割方法，7 号喷头仅对应部分靶标；8～10 号喷头占空比为 0，按照分割方法，喷头对应高度无靶标，以上喷头 PWM 占空比变化符合靶标冠层的密度分布。

## 4　结论与展望

本研究设计开发了一套变量喷雾控制系统，并成功移植到传统果园风送喷雾机上，实现了基

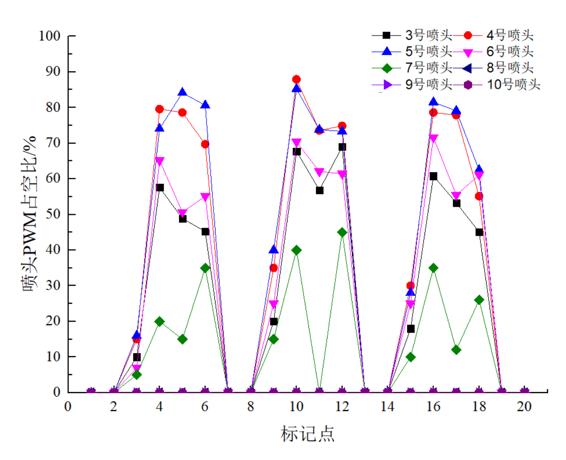



图 12 喷头占空比变化情况

Fig. 12 Variation of duty ratio of nozzle

于靶标叶面积密度变化进行变量喷雾的功能，并对该变量喷雾控制系统的喷雾性能进行了验证与评价，主要结论如下。

（1）提出了一种变量喷雾机软硬件开发方案，高效集成了LiDAR传感器、PLC控制器以及实现变流量输出的喷雾系统。

（2）提出了一套变量喷雾系统的控制方法，靶标施药单元内点云密度经函数计算可间接得到叶面积密度参数；基于叶面积密度大则喷雾量大的思路推导了基于叶面积密度的喷头流量计算方法；通过模型辨识方法获得了系统最终控制量，即PWM占空比的计算方法。

（3）通过试验验证了该变量喷雾机的喷雾性能，试验结果表明，通过水敏纸采样分析，测得单位面积（$cm^2$）最小雾滴个数为35滴，达到了有效喷雾效果；当靶标冠幅与总冠幅比为39.9 %时，变量喷雾模式相比于连续恒定式省药71.96%，相比于对靶开关式喷雾省药29.72%。

本研究开发的变量喷雾机为第一代样机，仍需要进一步的田间试验验证与优化改进，主要包括以下几个方面：

（1）结合北斗自主导航系统实现变量喷雾机自主导航行驶，消除人工作业偏离果树行间中心线轨迹引起的LiDAR测距误差，进一步提高靶标探测系统的测量精度。

（2）田间作业环境恶劣，路面不平，喷雾机行驶速度变化较大，融合北斗导航系统与编码器等多种传感器测量喷雾机行驶速度，从而计算更精准的系统延时时间，提高整个变量喷雾系统的实时性与对靶精度。

（3）变量喷雾机喷雾性能的进一步试验与测试，检测内容包括雾滴分布密度、雾滴沉积量、雾滴漂移量等参数指标。

## 参考文献：

[1] 邱威, 顾家冰, 丁为民, 等. 果园风送式喷雾机防治效果试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 94-99.
QIU W, GU J, DING W, et al. Experiment on control effect of different pesticide concentration using air-assisted sprayer[J]. Transactions of the CSAM, 2015, 46 (1): 94-99.

[2] 王万章, 洪添胜, 李捷, 等. 果树农药精确喷雾技术[J]. 农业工程学报, 2004(6): 98-101.
WANG W, HONG T, LI J, et al. Review of the pesticide precision orchard spraying technologies[J]. Transactions of the CSAE, 2004(6): 98-101.

[3] STAJNKO D, BERK P, LEŠNIK M, et al. Programmable ultrasonic sensing system for targeted spraying in orchards[J]. Sensors, 2012, 12(11): 15500-15519.

[4] 金鑫, 董祥, 杨学军, 等. 3WGZ-500型喷雾机对靶喷雾系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 21-27.
JIN X, DONG X, YANG X, et al. Design and experiment of target spraying system of 3WGZ-500 sprayer[J]. Transactions of the CSAM, 2016, 47(7): 21-27.

[5] 李瀚哲, 翟长远, 张波, 等. 果园喷雾靶标探测技术现状分析[J]. 农机化研究, 2016, 38(2): 1-5.
LI H, ZHAI C, ZHANG B, et al. Status analysis of orchard spray target detection technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(2): 1-5.

[6] 周良富, 薛新宇, 周立新, 等. 果园变量喷雾技术研究现状与前景分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 80-92.
ZHOU L, XUE X, ZHOU L, et al. Research situation and progress analysis on orchard variable rate spraying technology[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33 (23): 80-92.

[7] 张美娜, 吕晓兰, 常有宏, 等. 果树靶标精准探测系统研究进展分析[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(10): 227-233.
ZHANG M, LYU X, CHANG Y, et al. Discussion on importance of performance test based on agricultural machinery purchasing subsidy policy[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(10):

227-233
[ 8 ] 李丽, 李恒, 何雄奎, 等. 红外靶标自动探测器的研制及试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 159-163.
LI L, LI H, HE X, et al. Development and experiment of automatic detection device for infrared target[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(12): 159-163.
[ 9 ] 邹建军, 曾爱军, 何雄奎, 等. 果园自动对靶喷雾机红外探测控制系统的研制[J]. 农业工程学报, 2007(1): 129-132.
ZOU J, ZENG A, HE X, et al. Research and development of infrared detection system for automatic target sprayer used in orchard[J]. Transactions of the CSAE, 2007(1): 129-132.
[10] 俞龙, 洪添胜, 赵祚喜, 等. 基于超声波的果树冠层三维重构与体积测量[J]. 农业工程学报, 2010,26(11): 204-208.
YU L, HONG T, ZHAO Z, et al. 3D-reconstruction and volume measurement of fruit tree canopy based on ultrasonic sensors[J]. Transactions of the CASE, 2010, 26(11): 204-208.
[11] PALLEJA T, LANDERS A J. Real time canopy density validation using ultrasonic envelope signals and point quadrat analysis[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 134: 43-50.
[12] PALLEJA T, LANDERS A J. Real time canopy density estimation using ultrasonic envelope signals in the orchard and vineyard[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 115: 108-117.
[13] 徐伟恒, 冯仲科, 苏志芳, 等. 一种基于三维激光点云数据的单木树冠投影面积和树冠体积自动提取算法[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(2): 465-471.
XU W, FENG Z, SU Z, et al. An automatic extraction algorithm for individual tree crown projection area and volume based on 3D point cloud data[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(2): 465-471.
[14] 俞龙, 黄健, 赵祚喜, 等. 丘陵山地果树冠层体积激光测量方法与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 224-228.
YU L, HUANG J, ZHAO Z, et al. Laser measurement and experiment of hilly fruit tree canopy volume[J]. Transactions of the CSAM, 2013, 44(8): 224-228.
[15] 李震, 邓忠易, 洪添胜, 等. 基于神经网络的实蝇成虫图像识别算法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(S1): 129-135.
LI Z, DENG Z, HONG T, et al. Image recognition algorithm for fruit flies based on BP neural network[J]. Transactions of the CSAM, 2017, 48(S1): 129-135.
[16] SINGH V, MISRA A K. Detection of plant leaf diseases using image segmentation and soft computing techniques[J]. Information Processing in Agriculture, 2017, 4(1): 41-49.
[17] ROSELL J R, SANZ R. A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 81: 124-141.
[18] LIU H, ZHU H. Evaluation of a laser scanning sensor in detection of complex-shaped targets for variable-rate sprayer development[J]. Transactions of the ASABE, 2016, 59(5): 1181-1192.
[19] 李秋洁, 郑加强, 周宏平, 等. 基于车载二维激光扫描的树冠体积在线测量[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 309-314.
LI Q, ZHENG J, ZHOU H, et al. Online measurement of tree canopy volume using vehicle-borne 2-D laser scanning[J]. Transactions of the CSAM, 2016, 47(12): 309-314.
[20] 翟长远, 赵春江, WANG N, 等. 果园风送喷雾精准控制方法研究进展[J]. 农业工程学报, 2018, 34(10): 1-15.
ZHAI C, ZHAO C, WANG N, et al. Research progress on precision control methods of air-assisted spraying in orchards[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(10): 1-15.
[21] SANZ R, ROSELL J R, LIORENS J, et al. Relationship between tree row LiDAR-volume and leaf area density for fruit orchards and vineyards obtained with a LIDAR 3D dynamic measurement system[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 171-172: 153-162.
[22] 李龙龙, 何雄奎, 宋坚利, 等. 基于变量喷雾的果园自动仿形喷雾机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 70-76.
LI L, HE X, SONG J, et al. Design and experiment of automatic profiling orchard sprayer based on variable air volume and flow rate[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 70-76.
[23] 李秋洁, 袁鹏成, 邓贤, 等. 基于移动激光扫描的靶标叶面积计算方法[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 192-198.
LI Q, YUAN P, DENG X, et al. Calculation method of target leaf area based on mobile laser scanning[J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(5): 192-198.
[24] 薛秀云, 许旭锋, 李震, 等. 基于叶墙面积的果树施药量模型设计及试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(2): 16-22.
XUE X, XU X, LI Z, et al. Design and test of variable spray model based on leaf wall area in orchards[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(2): 16-22.
[25] 张美娜, 吕晓兰, 邱威, 等. 基于三维激光点云的靶标叶面积密度计算方法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 172-178.
ZHANG M, LYU X, QIU W, et al. Calculation method

of leaf area density based on three-dimensional laser point cloud[J]. Transactions of the CSAM, 2017, 48 (11): 172-178.

[26] 张美娜, 范道全, 雷晓晖, 等. 基于插值算法的靶标三维激光点云数据补偿研究[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(8): 59-64.
ZHANG M, FAN D, LEI X, et al. Research on data compensation for target with three-dimensional laser point cloud based on an interpolation algorithm[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(8): 59-64.

[27] 魏新华, 蒋杉, 张进敏, 等. 脉宽调制间歇喷雾变量喷施系统施药量控制[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 87-92.
WEI X, JIANG S, ZHANG J, et al. Application rate control characteristics of blended pulse variable rate application system[J]. Transactions of the CSAM, 2013, 44(2): 87-92.

[28] 翟长远, 王秀, 密雅荣, 等. PWM变量喷雾喷头流量模型[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 40-44.
ZHAI C, WANG X, MI Y, et al. Nozzle flow model of PWM variable-rate spraying[J]. Transactions of the CSAM, 2012, 43(4): 40-44.

[29] 中华人民共和国工业和信息化部. 植物保护机械通用试验方法: JB/T 9782—2014 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2014.

# Development and Performance Test of Variable Spray Control System Based on Target Leaf Area Density Parameter

FAN Daoquan[1], ZHANG Meina[2], PAN Jian[1], LYU Xiaolan[1*]

(1. *Institute of Agricultural Facilities and Equipment*, *Jiangsu Academy of Agricultural Sciences*, *Nanjing* 210014, *China*;
2. *Institute of Agricultural Information*, *Jiangsu Academy of Agricultural Sciences*, *Nanjing* 210014, *China*)

**Abstract:** Variable spray technology is an important means to improve pesticide utilization rate and save pesticide. Fruit tree is a kind of three-dimensional space, and the densities of branches and leaves in the canopy of fruit trees at different locations are different at the same time. The ideal state of spray is to adjust the amount of spray according to local characteristics, so as to realize the application of the spray on the canopy of fruit trees as required and improve the utilization rate of pesticide. In order to achieve the effect of reducing the dosage and increasing the efficiency of pesticide application, a variable spray control system was developed and the methods for computing leaf area density parameter and pulse width modulation(PWM)'s duty ratio of actuators were proposed. As the dosage parameter, the leaf area density was derived based on the point cloud density detected by LiDAR sensor on the upper computer. Then PWM's duty ratio was calculated based on the leaf area density and sent to the slave computer-PLC in real time. The communication between upper and slave computer was carried out through RS485 standard. So the spray flow of each nozzle was controlled by the switching frequency of the solenoid valve with PWM's duty ratio signal. Key parameters were obtained by the test including the net size of spray unit, delay time of the system and the function relationship between the PWM's duty ratio and the spray flow of nozzle. The test results showed that there was a linear relationship between the PWM's duty ratio and the spray flow of nozzle under the pressure of 0.2, 0.3 and 0.4 MPa, and the linear goodness of fit were all above 0.98. Finally, the effectiveness of the variable spray system was verified by the spray test. The test results showed that the minimum number of droplets per unit area ($cm^2$) on the water-sensitive paper was 35 drops at the sampling point, which was higher than the 25 drops defined by the common method for the spray amplitude of aerosol in the air supply spray. Under 39.9% of the canopy ratio between the target canopy area and the whole area, the variable spraying mode saved 71.96% of the pesticide dosage compared with the continuous spraying mode, and 29.72% compared with the target spraying mode, achieving the dose reduction effect.

**Key words:** variable spray; LiDAR; leaf area density; control strategy; pulse width modulation